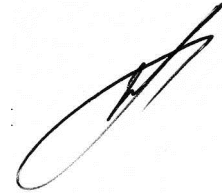


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

(НУ «ОМА»)

**Бурмака Олексій Ігорович**



УДК 656.61.052.484

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ РОЗХОДЖЕННЯ  
В СИТУАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНОГО ЗБЛИЖЕННЯ СУДЕН**

05.22.13 – навігація та управління рухом

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в НУ «ОМА» Міністерства освіти і науки України, м. Одеса

Науковий керівник: кандидат технічних наук  
**Сафін Ігор Вікторович**,  
Дочірнє підприємство "Ві Шіпс", "Ві Шіпс"  
(Україна), генеральний директор, м. Одеса

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Блінцов Володимир Степанович**,  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, проректор з наукової  
роботи

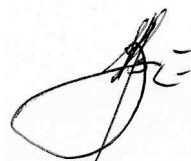
кандидат технічних наук  
**Репетей Володимир Дмитрович**,  
Філія "Дельта-лоцман" Державного підприємства  
"Адміністрація морських портів України",  
начальник служби безпеки мореплавства,  
Міністерство Інфраструктури України, м. Одеса

Захист відбудеться 15 червня 2016 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2 та за електронною адресою: [http://onma.edu.ua/index.php?quater\\_ua](http://onma.edu.ua/index.php?quater_ua).

Автореферат розісланий 12 травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д. т. н., професор.



Нікольский В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом все більша увага надається забезпеченню безпеки судноплавства шляхом підвищення його надійності і зменшення вірогідності аварійних випадків, особливо в стислих районах плавання суден. Інтенсивне судноплавство і навігаційні перешкоди значною мірою ускладнюють судноводіння в стислих водах і створюють підвищені ризики виникнення аварійних ситуацій. У разі небезпечного зближення і виникнення загрози зіткнення суден характер маневру їх розходження визначають Міжнародні правила попередження зіткнень суден (МППЗС-72). В стислих водах виникають ситуації надмірного зближення суден, коли для запобігання зіткненню кожне з суден повинне, згідно МППЗС-72, здійснити маневр безпечного розходження. У такій ситуації маневрування суден не координується МППЗС-72, і стратегії розходження суден не узгоджені, що ускладнює вибір безпечних маневрів попередження зіткнень.

Аналіз літературних джерел по проблемі попередження зіткнення суден показав, що питання вибору маневру розходження при надмірному зближенні суден потребує подальшого дослідження.

Формалізація взаємодії суден при надмірному зближенні утруднена незначеністю їх поведінки. Існуючі в даний час методи формування стратегій розходження суден не враховують ситуації надмірного зближення, що обумовлює актуальність і перспективність даного дисертаційного дослідження.

Тому питання екстреного розходження при надмірному зближенні стає актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., № 2174-р), Стратегії розвитку морських портів України на період до 2015 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 16.07.2008 р. №1051-р зі змінами, внесеними згідно з розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1561-р від 07.10.2009 р.), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» та Указу Президента України від 20.05.2008 р. №463/2008, а також в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» по держбюджетній «Розробка методів забезпечення безаварійного плавання суден» (№ ДР 0111U001610), в яких здобувач виконав окремий розділ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є безпечне розходження суден при надзвичайному зближенні суден.

Для цього прийнята гіпотеза про можливість вибору безпечного маневру ухилення від цілі, що небезпечно зближується, на принципах найкращого гарантованого результату з урахуванням необхідних і достатніх умов.

Головною задачею дослідження є розробка алгоритму безпечного маневру розходження при надзвичайному зближенні суден із загрозою зіткнення.

Для вирішення головної задачі були розглянуті наступні задачі:

- ідентифікація та формалізація ситуації надмірного зближення суден;
- розробка методу визначення множини параметрів стратегії екстреного розходження суден та вибір оптимального;
- урахування обмежуючих чинників при виборі стратегії екстреного розходження.

**Об'єктом дослідження** дисертації є процес маневрування суден.

**Предметом дослідження** є процес розходження суден.

**Методи дослідження.** У дисертаційному дослідженні для пошуку рішень поставлених завдань були застосовані методи:

- дедукції - при аналізі основних підходів рішення проблеми безпеки судноводіння;
- системного аналізу - для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;
- управління судном - для визначення необхідних залежностей, що описують ситуацію зближення і стратегію розходження;
- теорії диференціальних ігор - для визначення маневру ухилення судна в умовах невизначеної поведінки цілі;
- математичного програмування - для вибору оптимальних параметрів екстреної стратегії розходження.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що в залежності від мінімальної відстані до найближчої перешкоди гарантовано безпечне розходження суден забезпечується отриманім методом вибору екстреної стратегії з урахуванням невизначеності в поведінці цілі; чинників, що заважають; динаміки судна та структури маневру виходу на програмну траєкторію руху.

Вперше отримані наступні наукові результати:

- спосіб визначення ситуації надмірного зближення з урахуванням часу до можливого зіткнення, форми та розмірів вибраної зони безпеки, а також співвідношення максимальної дистанції найменшого зближення і мінімальної допустимої;
- процедура визначення структури маневру екстреного розходження, яка досягається генерацією стратегій маневрування, залежно від поточної відносної позиції, причому така структура в загальному вигляді містить етапи екстреного відхилення судна та виходу на його програмну траєкторію руху, або, залежно від початкової ситуації надмірного зближення, судно може запобігти зіткненню застосуванням циркуляції;
- процедура по одиночному та сумісному урахування наявності навігаційних перешкод і суден, що заважають, при розрахунку курсу відхилення екстреного розходження, на що впливають відносні позиції небезпечного судна та судна, що заважає, а також їх параметри руху з урахуванням критерію максимуму часу до можливого зіткнення.

Удосконалено спосіб розходження судна у випадку, коли ціль має перевагу в швидкості на попутних курсах, а судно запобігає зіткненню, виконуючи циркуляцію від небезпечної цілі та пропускаючи її.

Одержав подальший розвиток метод розходження суден при урахуванні поворотності судна.

**Практичне значення отриманих результатів** визначається тим, що її рекомендації по вибору маневру розходження можуть бути використані судноводіями в ситуаціях надмірного зближення, метод формування оптимальної стратегії екстреного розходження може бути упроваджений розробниками нових поколінь ЗАРП, що мають функції системи підтримки рішень при розходженні, а також алгоритми дослідження можуть бути застосовані при створенні сучасних морських тренажерів.

Результати дисертаційного дослідження упроваджені: у крюїнговій компанії «СМА ШПС Україна» - для передрейсової підготовки судноводіїв (акт від 16.12.2015 р.), у приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» - для підвищення якості підготовки судноводіїв (акт від 22.12.2015 р.), у судноплавній компанії «Бурбон Офшор Україна» - для розрахунку екстреного маневру розходження при надзвичайному зближенні суден на суднах компанії (акт від 08.12.2015 р.), в наукові дослідження ОНМА (акт від 07.02.2013 р.), а також в учбових програмах дисциплін ОНМА на кафедрі «Управління судном» в розділах забезпечення морехідної безпеки судна (акт від 25.12.2015 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно без співавторів.

Здобувач сформулював мету і головну задачу дисертаційного дослідження, використовуючи системний підхід, виконав огляд і аналіз літературних джерел по проблемі підвищення безпеки судноводіння, обґрунтував методологічне забезпечення дисертації, виконав натурні спостереження поворотності судна, обробив експериментальні дані, визначивши параметри поворотності судна, розробив імітаційну модель вибору маневру екстреного розходження, здійснив імітаційне моделювання та інтерпретацію отриманих результатів досліджень і отримав нові наукові результати. Сам написав дисертацію і автореферат. Самостійно виконав окремий розділ в держбюджетній науководослідній роботі з державною реєстрацією. З наукових робіт, опублікованих в співавторстві, в дисертації використані тільки ті положення, які належать автору особисто: аналіз проблеми, формулювання мети та задач дослідження [1], оцінка моменту часу попадання судна в ситуацію надзвичайного зближення [4], детальне викладення способу визначення параметрів екстремального маневру розходження суден при їх надмірному зближенні [12].

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні положення й результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення та позитивний відгук на міжнародних науково-технічних конференціях: «Забезпечення безаварійного плавання суден» (м. Одеса, ОНМА, 2011 р.); «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (м.

Одеса, ОНМА, 2012 р., 2013 р.); «Ефективна і безпечна експлуатація морських суден і споруд», (м. Севастополь, 2013 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в 14 наукових роботах (з них 11 одноосібно), зокрема: у наукових профільних виданнях, що входять в перелік МОН України - 7 наукових статей [1-4, 7, 13, 14]; у зарубіжних наукових профільних виданнях - 2 наукові статті [5, 6] і 1 монографія [12], в збірках матеріалів наукових конференцій - 4 тези доповідей [8-11].

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних літературних джерел із 167 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи - 244 сторінок, у тому числі: 169 сторінок основного тексту, 58 сторінок додатку, 17 сторінок списку літератури, містить 50 рисунків і 7 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та завдання дослідження, показано наукову новизну і практичне значення роботи.

У **першому розділі** «Огляд літератури по проблемі забезпечення безпеки судноводіння та вибір основного напрямку дисертаційного дослідження» проведено аналіз основних напрямків дослідження проблеми забезпечення безпеки судноводіння і здійснено вибір напрямку дисертаційного дослідження.

Огляд та аналіз літератури по темі дисертаційної роботи показав, що основна увага була приділена проблемі забезпечення безпеки судноводіння шляхом комплексного вирішення питань підвищення точності визначення місця судна, вдосконалення методів управління суднами та попередження зіткнень суден в стислих умовах плавання.

В рішення цих проблем значний внесок зробили багато вітчизняних та іноземних вчених, таких як: Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Цимбал М.М., Вагущенко Л.Л., Бурмака І.О., Пятаков Е.М., Фрейдзон І.Р., Lisowski J., та інші, які показали, що найбільш актуальними є теоретичні та практичні дослідження з проблеми безпечного розходження суден. Огляд літературних джерел і аналіз підходів для рішення проблеми безпечного розходження суден показали, що успіх безпечного розходження в значній мірі залежить від системи взаємодії суден в ситуації небезпечного зближення, особливо при надмірному зближенні. Питання по даній тематиці практично не розглянуті і потребують серйозних наукових досліджень.

Такий висновок дав можливість обґрунтувати основні напрями дисертаційного дослідження, яке присвячене проблемі попередження зіткнень суден в разі надмірного зближення шляхом розробки методу формування екстреної стратегії розходження.

У **другому розділі** «Методологічне обґрунтування дослідження за темою дисертації» з допомогою результатів першого розділу обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження та його методологічного забезпечення.

Методами системного підходу розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, в якій визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані робоча гіпотеза та головна задача дослідження.

Для вирішення головної наукової задачі були сформульовані три складові задачі.

Вирішення першої складової задачі потребує розробки математичної моделі ідентифікації ситуації надмірного зближення судна з ціллю з урахуванням форми безпечної області судна, відносної позиції та параметрів руху судна і цілі.

Для вирішення другої складової задачі необхідно розробити метод розрахунку параметрів стратегії екстреного розходження, використовуючи методи диференційних ігор.

Третя складова задача - урахування навігаційних перешкод і динаміки судна при виборі стратегії екстреного розходження. Для вирішення цієї задачі слід використати методи управління судном.

Вирішення головної задачі дослідження - розробки алгоритму визначення безпечного маневру розходження при надзвичайному зближенні суден - досягнуто шляхом синтезу рішень складових задач. На його підґрунті було сформульовано наукове положення, яке є узагальненням теоретичних результатів дослідження.

У **третьому розділі** «Формалізація ситуації надзвичайного зближення суден та стратегії екстреного розходження» розроблено математичну модель ідентифікації надмірного зближення судна з ціллю, яка враховує форму безпечної області судна, відносну позицію судна і цілі та параметри їх руху, що необхідно для вирішення першої допоміжної задачі.

Ситуація надмірного зближення і маневр екстреного розходження характеризуються Правилем 17, згідно якому:

«(iii) Коли судно, зобов'язане зберігати курс і швидкість, виявить, що судно, яке повинне поступитися дорогою, знаходиться настільки близько, що зіткнення не можна уникнути, то воно повинне вжити всіх заходів, щоб уникнути зіткнення». При цьому обов'язок попередження зіткнення згідно Правилу 16 не знімається з судна, яке повинне поступитися дорогою.

Отже, в ситуаціях надмірного зближення МППЗС-72 вимагає від обох суден вживати належних заходів, що забезпечують безпечне розходження. У таких ситуаціях обидва судна приймають рішення в умовах невизначеності щодо майбутніх дій партнера.

При формалізації ситуації надмірного зближення відсутні обмеження можливих початкових відносних позицій, проте не враховуються можливі навігаційні перешкоди. При розходженні розглядається маневрування суден тільки зміною курсу, причому інерційність судна враховується в першому наближенні за допомогою радіусу циркуляції. Останнє допущення не має принципового значення, оскільки не впливає на вибір типу стратегії розходження в такій ситуації.

Першим етапом даної задачі являється визначення ситуації надмірного зближення суден.

Ситуація надмірного зближення суден виникає, коли максимально можлива дистанція найкоротшого зближення  $\max D_{\min}$ , яка може бути досягнута найефективнішим маневром судна, виявиться меншою, ніж мінімальна гранично-допустима дистанція найкоротшого зближення  $\min D_{dop}$ . Отже, умову приналежності судна до області надмірного зближення аналітично можна записати таким чином:

$$\max D_{\min} < \min D_{dop}.$$

Знайдемо вираз для величини максимальної дистанції найкоротшого зближення  $\max D_{\min}$ , яка може бути досягнута судном при зміні його курсу  $K_o$ . У роботі вказано, що максимальне значення  $D_{\min}$  досягається при найбільшому значенні величини  $|\sin(K_{ot} - \alpha)|$ . Очевидно, якщо швидкість судна більше швидкості цілі, то найбільше значення виразу  $|\sin(K_{ot} - \alpha)|$  досягається при  $K_{ot} = \alpha + \pi/2$  або  $K_{ot} = \alpha - \pi/2$  і максимальне значення дистанції найкоротшого зближення рівне початковій дистанції  $D_n$ , тобто  $\max D_{\min} = D_n$ .

Якщо ж швидкість судна менше швидкості цілі, то  $\max D_{\min}$  досягається при граничних відносних курсах  $K_{ot\min}$  або  $K_{ot\max}$ , які, як показано в роботі, визначаються наступними виразами:

$$K_{ot\min} = \pi + K_c - \arcsin \rho \text{ і } K_{ot\max} = \pi + K_c + \arcsin \rho.$$

Позначаючи  $K_{extr}$  екстремальний відносний курс ( $K_{ot\min}$  або  $K_{ot\max}$ ), на якому дистанція найкоротшого зближення  $D_{\min}$  максимальна, у разі ухилення судна в початковий момент часу за умови, що ціль не змінює параметри руху, вираз для  $\max D_{\min}$  має наступний вигляд:

$$\max D_{\min} = D_n \sin(K_{extr} - \alpha_n),$$

де  $\alpha_n$  - пеленг на ціль.

Оскільки в цьому випадку  $\sin(K_{extr} - \alpha_n) < 1$ , то  $\max D_{\min} < D_n$ . Враховуючи, що існують два екстремальні відносні курси, які не є симетричними щодо лінії пеленга, тому максимальна дистанція найкоротшого зближення має два значення при максимальному відносному курсі ухилення  $\max D_{\min}^{(mx)} = D_n \sin(K_{ot\max} - \alpha_n)$  і при мінімальному -  $\max D_{\min}^{(mn)} = D_n \sin(K_{ot\min} - \alpha_n)$ , з яких в якості  $\max D_{\min}$  вибирається більше.

Мінімальна гранично-допустима дистанція найкоротшого зближення  $\min D_{dop}$  залежить від форми області ризику зіткнення, в якій знаходиться судно, причому в цю область не повинні потрапляти інші об'єкти щоб уникнути зіткнень.

Стандартним описом такої області є коло, в центрі якого знаходиться судно, а радіусом є гранично-допустима дистанція зближення  $D_{dop}$ . Очевидно, що в цьому випадку область ризику зіткнення характеризується значенням  $D_{dop}$ .



Проте у багатьох роботах пропонується інша форма області ризику зіткнення, тому в дисертаційному дослідженні розглянуті найчастіше пропоновані області ризику зіткнення у вигляді еліптичної та прямокутної форми, які характеризуються трьома параметрами  $l_n$  - відстань по носу судна,  $l_k$  - відстань по кормі і  $b$  - відстань по траверзу.

Якщо характеризувати ситуацію надмірного зближення, то розміри області ризику зіткнення повинні враховувати габарити суден, явище присмоктування і інерційність судна. Причому у разі, коли область ризику зіткнення має форму круга і застосовується маневр розходження зміною курсу, то єдина характеристика області - радіус кола, що дорівнює мінімальній гранично-допустимій дистанції найкоротшого зближення  $\min D_{dop}$ , величина якої визначається габаритами суден, що зближуються, і запасом дистанції для попередження явища присмоктування. Якщо позначити через  $D_{dop1}$  запас дистанції, що враховує габарити судна і цілі, то його найбільше значення представляє суму ширини судна  $B_o$  і довжини цілі  $L_c$ , що має місце при проходженні судна і цілі на перпендикулярних курсах. Тому:  $D_{dop1} = B_o + L_c$ .

Запас дистанції для попередження явища присмоктування  $D_{dop2}$  складає біля 100 м. Отже, мінімальна гранично-допустима дистанція найкоротшого зближення при круглій формі області ризику зіткнення визначається виразом  $\min D_{dop} = D_{dop1} + D_{dop2}$ .

Проте у випадках, коли область ризику зіткнення має форму еліпса або прямокутника, визначення мінімальної гранично-допустимої дистанції найкоротшого зближення виявляється набагато складніше, оскільки дистанція від центру області до її межі не є постійною, причому розміри області характеризується трьома параметрами які крім габаритів судів і явища присмоктування визначаються ще і інерційністю судна. У першому наближенні зарубіжними дослідниками експериментально встановлено, що інерційність судна враховується додатковим запасом дистанції по носу, кормі і бортам судна, причому по носу судна - 10 його довжин, по кормі - 3 довжини і по траверзах - 5 довжин. Таким чином, сумісний облік трьох чинників дає наступні параметри області ризику зіткнення:

$$l_n = D_{dop1} + D_{dop2} + 10L_o, \quad l_k = D_{dop1} + D_{dop2} + 3L_o, \quad b = D_{dop1} + D_{dop2} + 5L_o.$$

Якщо область ризику зіткнення має форму еліпса з більшою  $a$  і меншою  $b$  напівосями, а швидкість судна менше швидкості цілі, то існує два значення величини мінімальної гранично-допустимої дистанції зближення  $\min D_{dop1}$  і  $\min D_{dop2}$ , які розраховуються за допомогою формул (рис. 1):

$$\min D_{dop1} = \sqrt{b^2 + x_1^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)}, \quad \min D_{dop2} = \sqrt{b^2 + x_2^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)},$$

$$\text{де } x_1 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} + \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$x_2 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} - \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K - \bar{X}_o \cos K)} \quad \text{і} \quad r = (\bar{Y}_o \cos K + \bar{X}_o \sin K).$$

Ситуація надмірного зближення відсутня при справедливості нерівностей  $\max D_{\min}^{(mn)} > \min D_d^{(mn)}$  і  $\max D_{\min}^{(mx)} > \min D_d^{(mx)}$ .

Аналогічно визначається ситуація надмірного зближення, коли область ризику зіткнення має форму прямокутника.

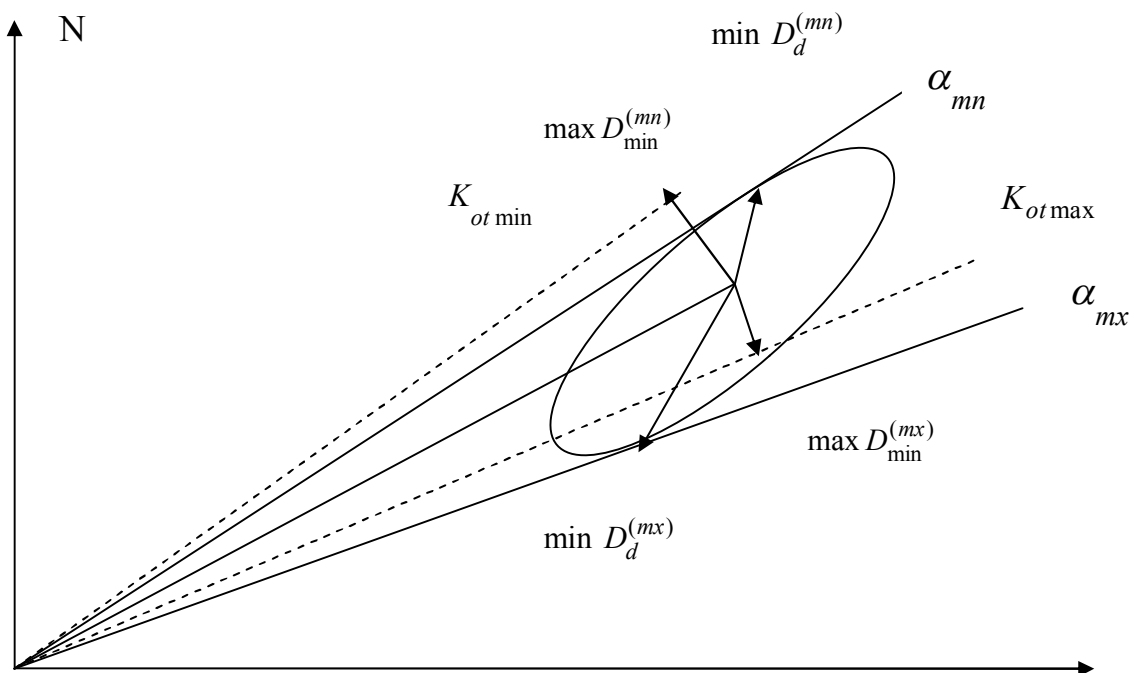


Рисунок 1 - Виявлення ситуації надмірного зближення при еліптичній формі області ризику зіткнення

Мінімальна гранично-допустима дистанція найкоротшого зближення може приймати тільки два значення більше  $D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}$  і менше  $D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}$ . Оскільки граничні пеленга  $\alpha_{mx}$  і  $\alpha_{mn}$  проходять через дві точки, які знаходяться у вершинах прямокутника, то значення  $\min D_d^{(mn)}$  і  $\min D_d^{(mx)}$  можуть приймати одне з двох значень  $D_n$  або  $D_k$ .

Значення мінімальних дистанцій  $\min D_d^{(mn)}$  і  $\min D_d^{(mx)}$  визначається співвідношенням курсу цілі  $K_c$  і пеленга на неї  $\alpha$ .

Алгоритм визначення ситуації надмірного зближення в цьому випадку точно такий же, як і у разі області ризику зіткнення еліптичної форми. У разі, коли область ризику зіткнення має форму кола і мінімальна гранично-допустима дистанція найкоротшого зближення має постійне значення, рівне  $D_{dop1} + D_{dop2}$ , ситуація надмірного зближення існує, якщо справедливі нерівності:

$$D_o \sin(K_{ot\min} - \alpha_o) < D_{dop1} + D_{dop2};$$

$$D_o \sin(K_{ot\max} - \alpha_o) < D_{dop1} + D_{dop2}.$$

В розділі розглянуто формування структури стратегії екстреного розходження в залежності від характеристики поточної відносної позиції. При надзвичайному зближенні необхідно враховувати відсутність інформації про наміри цілі по вибору маневру розходження, тобто подальші значення параметрів руху цілі не можуть бути прогнозованими. Доступною є тільки інформація про початкову і поточну позицію цілі, її початковий курс та швидкість. Дана задача відноситься до типу задач управління з неповною інформацією, для вирішення якої доцільно використовувати методи диференціальних позиційних ігор, тому першим етапом процесу розходження є дії судна, що знаходиться в початковій позиції ситуації надмірного зближення, по попередженню можливого зіткнення за допомогою екстреного маневру.

На першому етапі стратегії екстреного розходження вимагається негайно зробити маневр, який би забезпечив якщо не збільшення дистанції між суднами при довільному маневруванні цілі, то хоча б мінімальну швидкість їх зближення. Оскільки поведінка цілі в ситуації, що склалася, є невідомою, то маневр розходження необхідно вибирати, виходячи з її найгіршого маневру, яким є поворот цілі на курс рівний пеленгу на судно. В цьому випадку швидкість скорочення дистанції між суднами буде максимальною, і загроза зіткнення зростатиме. Судно може мінімізувати швидкість зближення зміною курсу  $K_1$  рівного напрямку протилежному пеленгу на ціль, тобто рівного  $K_1 = \alpha + \pi$ .

У випадку, якщо швидкість судна перевищує швидкість цілі, тобто  $V_1 > V_2$ , то дистанція між судном і ціллю збільшується і загроза зіткнення зникає. Інакше ( $V_1 \leq V_2$ ) дистанція скорочується з мінімальною швидкістю і максимально збільшується час найкоротшого зближення, що дає можливість цілі зробити маневр безпечного розходження.

У будь-якому випадку, якщо ціль навмисно не прагнучиме до зіткнення, а судно зробить запропонований маневр, дистанція між судном і ціллю почне збільшуватися. Коли вона досягне гранично-допустимого значення, судно може лягти на курс, при якому дистанція найкоротшого зближення не зменшується і відбувається зближення з програмною траєкторією руху.

Таким чином, після повороту судна на курс  $K_o$ , коли максимально можлива дистанція найкоротшого зближення  $\max L_{\min}$  не перевищує гранично-допустиму дистанцію  $L_d$ , тобто  $\max L_{\min} \leq L_d$ , судно прямує курсом  $K_o = \alpha + 180$ , причому цей курс змінюється із зміною пеленга  $\alpha$ , оскільки відбувається переміщення цілі щодо судна. Очевидно, що в цьому випадку курс судна прагне до

початкового програмного курсу, а дистанція між судном і ціллю в загальному випадку збільшується. Якщо швидкість судна менше швидкості цілі  $V_2 > V_1$ , то при зміні курсу судна на  $360^\circ$  відносних курсів змінюється лише в деякому секторі, досягаючи максимального і мінімального значень  $K_{ot\min}$  і  $K_{ot\max}$ . Отже, при  $\rho < 1$  для всіх істинних курсів судна з діапазону від  $0$  до  $2\pi$  відносний курс прийматиме значення з діапазону  $[K_{ot\min}, K_{ot\max}]$ . Якщо ж  $\rho \geq 1$ , то відносний курс змінюється від  $0$  до  $2\pi$  при зміні істинного курсу судна в тих же межах.

Оскільки з моменту часу початку відвороту судна від початкового програмного курсу пеленг  $\alpha$  і дистанція  $D$  змінюються, то у момент часу  $t_{on}$  досягнення курсу судна значення курсу  $K_o = \alpha + 180$  необхідно оцінити поточну відносну позицію. Для цього слід розрахувати екстремальні відносні курси і обчислити максимально можливу дистанцію найкоротшого зближення  $\max L_{\min}$ . Потім належить перевірити справедливість нерівності  $\max L_{\min} \leq L_d$ . Якщо рівність справедлива, то належить і далі слідувати курсом  $K_o$ , утримуючи курс судна протилежним пеленгу на ціль, прагнучи збільшити дистанцію до цілі. При цьому належить контролювати співвідношення  $\max L_{\min} \leq L_d$ . При справедливості даної нерівності судно продовжує слідувати курсом  $K_o$  до тих пір, поки максимально можлива дистанція найкоротшого зближення  $\max L_{\min}$  не стане рівній дистанції найкоротшого зближення  $L_d$ , тобто  $\max L_{\min} = L_d$ . В даний момент часу  $t_{ok}$  необхідно змінити курс судна на величину, при якій досягається екстремальне значення відносного курсу і максимальне значення дистанції найкоротшого зближення. При цьому курси судна рівні:

$$K_{o\min} = K_2 + \arccos(\rho), \text{ або } K_{o\max} = K_2 - \arccos(\rho).$$

Слідуючи одним з вказаних курсів, судно переміщається у бік цілі, причому дистанція  $D$  між судном і ціллю скорочується, причому контролюється справедливість нерівності  $L_{\min} \leq L_d$ . Якщо нерівність справедлива, то продовжуємо слідувати екстремальним курсом. У момент часу, коли нерівність обертається в рівність, перевіряємо, чи не досягла дистанція між судном і ціллю значення  $L_d$ , тобто справедливості рівності  $D = L_d$ . Якщо рівність дотримується, то реалізувався момент часу  $t_b$ , і є можливість лягти на курс виходу на програмну траєкторію  $K_b$ , причому ділянка виходу на програмну траєкторію руху судна розташована під кутом  $\gamma = 30^\circ - 40^\circ$  до програмної траєкторії, тобто  $K_b = K_n \pm \gamma$ , де  $K_n$  - початковий курс судна.

Судно слідує курсом виходу  $K_b$  до тих пір, поки не досягає програмної траєкторії, після чого лягає на початковий курс  $K_n$ , переміщуючись по програмній траєкторії.

Якщо ж рівність  $D = L_d$  не виконується, тобто судно не досягло моменту повороту до програмної траєкторії  $t_b$ , то йому слід лягти на курс ухилення  $K_y$ , який розраховується по формулі:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_2 - K_{oty})],$$

де  $K_{oty} = \alpha_y + \arcsin(\frac{L_d}{D_y})$  - відносний курс ухилення;

$\alpha_y$  і  $D_y$  - відповідно пеленг і дистанція у момент часу  $t_{ok}$ .

У момент часу  $t_{on}$  досягнення курсу судна значення курсу  $K_o = \alpha + 180$  має місце нерівність  $\max L_{\min} \geq L_d$ , то необхідно перевірити можливість виходу судна на програмну траєкторію курсом  $K_b$ , для чого належить здійснювати контроль зміни дистанції при проходженні цим курсом. Якщо дистанція збільшується, то судно може виходити на задану траєкторію. Інакше при зменшенні дистанції необхідно розрахувати дистанцію найкоротшого зближення  $L_{\min b}$  при проходженні курсом  $K_b$  з позиції у момент часу  $t_{on}$ . Якщо справедлива нерівність  $L_{\min b} \geq L_d$ , то судно реалізує ділянку виходу на програмну траєкторію. Якщо ж нерівність не виконується, то слід розрахувати курс ухилення  $K_y$ , при якому дистанція найкоротшого зближення  $L_{\min}$  рівна гранично-допустимій дистанції  $L_d$ , тобто  $L_{\min} = L_d$ .

Структура стратегії екстреного розходження є послідовністю етапів руху з моменту ідентифікації ситуації надмірного зближення до моменту повернення судна на програмну траєкторію руху. Аналіз вищевикладеного показує, що перший і п'ятий етапи обов'язково містяться у всіх типах структури стратегії екстреного розходження. У загальному випадку можливі чотири типи структури  $S_i$  стратегії екстреного розходження, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Склад структури стратегії екстреного розходження

Типи структури екстреної стратегії $S$	Послідовність етапів $G$
$S_1$	$\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$
$S_2$	$\{G_1, G_3, G_4, G_5\}$
$S_3$	$\{G_1, G_4, G_5\}$
$S_4$	$\{G_1, G_5\}$

Перший етап  $G_1$  відповідає перехідному процесу з початкового курсу до виходу судна на курс рівний  $K_\alpha = \alpha + 180$ . Другий етап екстреного ухилення  $G_2$  передбачає проходження судна курсом  $K_\alpha$  до закінчення етапу. Черговий третій етап екстремального ухилення  $G_3$  забезпечує проходження судна екстремальними курсами при зближенні з ціллю на зустрічних курсах. Етап стандартного ухилення  $G_4$  (четвертий) передбачає зближення з ціллю на най-

коротшу дистанцію, рівну гранично-допустимій  $L_d$ . І, нарешті, п'ятий етап  $G_5$ , - етап виходу на задану траєкторію завершує стратегію розходження.

В розділі розроблена процедура урахування навігаційних небезпек і заважаючих суден в районі маневрування оперуючого судна при розрахунку параметрів маневру екстреного розходження.

Таким чином, в розділі розроблено математичну модель ідентифікації надмірного зближення судна з ціллю.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [1, 2, 7, 9, 12, 13].

**Четвертий розділ** «Формування методу розрахунку параметрів стратегії екстреного розходження судна» присвячений розробці методу розрахунку параметрів стратегії екстреного розходження, яка забезпечує безпечне плавання судна на етапах ухилення і повернення на програмну траєкторію руху, що є змістом другої складової задачі дослідження.

На початку четвертого розділу приведена процедура розрахунку моменту часу попадання судна в ситуацію надмірного зближення залежно від форми області ризику зіткнення.

Для випадку, коли область ризику зіткнення має форму кола, розрахунок значення моменту часу  $t_{np}$  здійснюється по формулі:

$$t_{np} = \min(t_{mx}, t_{mn}),$$

$$\text{де } t_{mx} = \frac{\min D_{dop}}{V_{ot} \sin(K_{oto} - K_{otmx})} \quad \text{і} \quad t_{mn} = \frac{\min D_{dop}}{V_{ot} \sin(K_{oto} - K_{otmn})},$$

$K_{oto}$  і  $V_{ot}$  - відповідно відносні курс і швидкість.

Якщо  $t_{np} \leq 0$ , то початкова ситуація є ситуацією надмірного зближення.

Аналогічно проводиться ідентифікація початкової ситуації у разі еліптичної і прямокутної форми області ризику зіткнення.

На першому етапі стратегії екстреного розходження повинна виконуватися умова:

$$L(t) \geq R_d, \text{ для } t_{np} \leq 0,$$

де  $L(t)$  - поточна відстань між суднами;

$R_d$  - гранично-допустима дистанція між ними.

У роботі показано, що на першому етапі стратегії судно повинно змінювати свій курс в сторону від цілі з максимальною кутковою швидкістю, прагнучи до курсу  $K_\alpha = \alpha(t) + \pi$ .

Перший етап завершується у момент часу, коли судно виходить на курс, рівний зворотному пеленгу на ціль, - курс екстреного розходження  $K_\alpha$ . Утримуючи ціль на зворотному пеленгу, судно прагне досягнути ситуації, що дозволяє зробити поворот до виходу на програмну траєкторію і забезпечити безпечне зближення з ціллю.

У ситуації надмірного зближення можуть реалізуватися підмножини ситуацій, які представлені в табл. 2.

Враховуючи, що розглядається випадок, коли швидкість судна менше швидкості цілі, то при незмінних параметрах руху цілі незалежно від курсу судна дотримується умова  $L_{\min} = D > L_d$ , судно опиняється в ситуації  $M_{n8}$  і може слідувати на програмну траєкторію руху.

Умови зміни ситуацій приведені в табл. 3, при цьому вказуються момент часу і курс проходження на етапі стратегії екстреного розходження, що реалізувався. Стратегія повернення на програмну траєкторію руху  $S_b$  визначається впорядкованою послідовністю етапів, яка передбачає їх реалізацію в строгій послідовності.

Таблиця 2 - Визначення підмножин  $M_{ni}$

Підмножини	Характеристика
$M_{n1}$	Ситуація надмірного зближення, дистанція скорочується.
$M_{n3}$	Ситуація вибору екстремального курсу, дистанція скорочується.
$M_{n5}$	Ситуація попереднього ухилення, дистанція скорочується.
$M_{n7}$	Ситуація виходу на задану траєкторію, дистанція скорочується.
$M_{n8}$	Ситуація виходу на задану траєкторію, дистанція збільшується.

Таблиця 3 - Можливі зміни ситуацій при екстреному маневруванні

Переходи ситуацій	Умови переходів	Моменти часу	Курси проходження	Етапи розходження
$Mn_o > Mn_1$	$\max L_{\min} \leq L_d$	$t_{on}$	$K_\alpha$	$G_2$
$Mn_o \rightarrow Mn_3$	$\max L_{\min} = L_d$	$t_{on}$	$K_{ex}$	$G_3$
$Mn_o \rightarrow Mn_5$	$L_{\min} \leq L_d$	$t_{on}$	$K_y$	$G_4$
$Mn_o \rightarrow Mn_7$	$L_{\min b} \geq L_d$	$t_{on}$	$K_b$	$G_5$
$Mn_o \rightarrow Mn_8$	$\dot{D} > 0$	$t_{on}$	$K_b$	$G_5$
$Mn_1 \rightarrow Mn_3$	$\max L_{\min} = L_d$	$t_{ok}$	$K_{ex}$	$G_3$
$Mn_3 \rightarrow Mn_5$	$L_{\min} \leq L_d$	$t_y$	$K_y$	$G_4$
$Mn_5 \rightarrow Mn_7$	$L_{\min b} \geq L_d$	$t_b$	$K_b$	$G_5$
$Mn_7 \rightarrow Mn_8$	$\dot{D} > 0$		$K_b$	$G_5$
$Mn_8 \rightarrow Mn_k$		$t_k$	$K_{2o}$	

Залежність структури стратегії від ситуації  $Mn(t_{on})$ , що реалізувалася, приведена в табл. 4. Враховуючи, що кожен етап стратегії розходження характеризується курсом проходження судна і часом початку етапу, параметрами страте-

гії розходження є курси і час початку етапів, що становлять стратегію  $S_b$ , що також відображене в табл. 4.

Розглянемо стратегію  $S_{b1}$ . У момент часу  $t_{on}$  судно рухається курсом  $K_\alpha$ . Оскільки зберігається ситуація надмірного зближення, то ціль може зберігати параметри руху або виконати ухилення, тому прогноз моменту часу  $t_{ok}$  неможливий, слід лиш періодично розраховувати значення  $\max L_{\min}$  для поточної відносної позиції судна і перевіряти істинність умови  $\max L_{\min} = L_d$ . Коли умова виконається, судну слід лягати на курс  $K_{ex}$ , зафіксувавши момент часу  $t_{ok}$ , і слідувати цим курсом до моменту часу  $t_y$ , в який необхідно змінити свій курс на величину  $K_y$ .

Таблиця 4 - Структура і параметри стратегії  $S_b$

$Mn(t_{on})$	Структура стратегії $S_b$	Параметри стратегії $S_b$
$Mn_1$	$S_{b1} = \{G_2, G_3, G_4, G_5\}$	$(t_{on}, K_\alpha), (t_{ok}, K_{ex}), (t_y, K_y), (t_b, K_b)$
$Mn_3$	$S_{b2} = \{G_3, G_4, G_5\}$	$(t_{on}, K_{ex}), (t_y, K_y), (t_b, K_b)$
$Mn_5$	$S_{b3} = \{G_4, G_5\}$	$(t_{on}, K_y), (t_b, K_b)$
$Mn_7, Mn_8$	$S_{b4} = G_5$	$(t_{on}, K_b)$

Причому курс  $K_y$  вибирається так, щоб відповідний курс  $K_{oty}$  відрізнявся на  $90^\circ$  щодо попереднього, тобто  $K_{oty} = K_{otex1} + 90^\circ$ . Якщо через обмеження швидкості судна такий відносний курс недосяжний, то в якості  $K_{oty}$  обирається інший екстремальний курс, тобто  $K_{oty} = K_{otex2}$ . В цьому випадку параметри  $t_y$  і  $K_y$  розраховуються за допомогою виразів:

$$t_y = t_{ok} + \frac{L(t_{ok}) \cos[\alpha(t_{ok}) - K_{otex1}] + L_d}{V_{otex1}},$$

де  $V_{otex1} = [V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2 \cos(K_{ex} - K_2)]^{1/2}$ ;

$$K_y = 3\pi / 2 + K_2 \pm \arcsin \rho - \arcsin\left(\frac{\sqrt{1 - \rho^2}}{\rho}\right).$$

Якщо відносним курсом ухилення обирається інший екстремальний курс, тобто  $K_{oty} = K_{otex2}$ , то курс ухилення, як показано в роботі, визначається виразом  $K_{yex} = K_2 \pm \arccos \rho$ .

Завершальні параметри  $t_b$  і  $K_b$  четвертого етапу стратегії  $S_{b1}$  визначаються таким чином. Величина курсу  $K_b$  визначається формулою  $K_b = K_{1n} + a\gamma$ , де  $a$  приймає значення  $+1$ , якщо у момент часу  $t_y$  судно знаходиться ліворуч від програмної траєкторії, і значення  $-1$ , якщо воно знаходиться праворуч від нього;  $K_{1n}$  - програмний курс судна до маневру розходження;  $\gamma$  - кут рівний  $30^\circ$ - $40^\circ$ .



Значення часу  $t_b$  повороту до програмної траєкторії руху, визначається по формулі:

$$t_b = t_y + \frac{\Delta_2 L_d + V_{otex} t_y \sin(K_{otb} - K_{otex}) + L(t_{ok}) \sin[\alpha(t_{ok}) - K_{otb}]}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

Звертаємо увагу, що при розрахунку параметрів стратегії  $S_{b2}$  моменти часу закінчення першого і другого етапів співпадають, тобто  $t_{on} = t_{ok}$  і стратегія  $S_{b2}$  починається з третього етапу. Очевидно, що розрахунок її параметрів виконується аналогічно попередній, тільки замість моменту часу початку третього етапу  $t_{ok}$  приймається момент часу  $t_{on}$ .

У стратегії  $S_{b3}$  параметри  $t_y$  і  $K_b$  відомі, причому  $t_y = t_{on}$ , а значення курсу виходу  $K_b$  вибирається аналогічно попереднім стратегіям.

Курс ухилення для зустрічних курсів  $K_y$  визначається формулою:

$$K_y = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \arcsin\left\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on})) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right]]\right\},$$

а для попутних курсів:

$$K_y = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \pi - \arcsin\left\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on})) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right]]\right\}.$$

На закінчення звертаємося до стратегії  $S_{b4}$ , при реалізації якої у момент часу  $t_{on} = t_b$  судно лягає на курс виходу, розрахунок якого показаний раніше.

В розділі також розглянуте екстрене розходження судна з ціллю при надмірному зближенні на попутних курсах. Надмірне зближення на попутних курсах можливе тільки в ситуації переваги швидкості мети над швидкістю судна, тобто  $V_1 < V_2$ . Визначення ситуації надмірного зближення на попутних курсах виконується аналогічно ситуації зближення на зустрічних курсах, і умовою належності до цієї ситуації, як раніше показано, є справедливність нерівності  $\max L_{\min} \leq L_d$ .

Як тільки встановлено факт надмірного зближення, судно визначає сторону повороту і виконує його з максимальною кутковою швидкістю, реалізуючи перший етап екстреної стратегії розходження. Особливістю екстреного розходження на попутних курсах являється швидке досягнення нульового значення швидкості зміни дистанції  $\dot{D}$ .

Тому при циркуляції перед моментом завершення першого етапу стратегії  $t_{on}$  здійснюється контроль значення першої похідної дистанції між судном і ціллю. Якщо  $\dot{D} > 0$ , то судно продовжує циркуляцію до виходу на початкову траєкторію програмного руху. Інакше у момент часу  $t_{on}$  судно виходить на курс  $K_\alpha$  і виконує другий етап маневру стратегії екстреного розходження, слідуючи курсом  $K_\alpha$  і безперервно контролюючи швидкість зміни дистанції до цілі  $\dot{D}$ .

Якщо на інтервалі часу до моменту закінчення другого етапу  $t_{ok}$  дистанція перестане скорочуватися, а ціль продовжує слідувати з незмінними параметра-

ми руху, то реалізується ситуація  $M_{n8}$ , і судну слід лягати на курс виходу на програмну траєкторію руху. Якщо ж дистанція продовжує скорочуватися, то у момент часу  $t_{ok}$  другий етап завершується і далі судно реалізує стратегію виходу на програмну траєкторію, аналогічно випадку руху судна і цілі на зустрічних курсах, за винятком того, що при попутних курсах здійснюється постійний контроль знаку першої похідної дистанції до цілі за часом. У момент часу, коли перша похідна, дистанція досягає свого мінімального значення, і при незмінних значеннях швидкості і курсу цілі починає збільшуватися, що дає можливість судну лягати на курс виходу на задану траєкторію.

На закінчення розділу розглянуто урахування інерційності судна при оцінці ситуації надмірного зближення і розрахунку параметрів маневру екстреного розходження, використовуючи математичну модель обертального руху третього порядку.

Таким чином, у розділі вперше розроблено метод розрахунку параметрів стратегії екстреного розходження.

Матеріали розділу опубліковані у роботах [5, 6, 8, 10, 12].

У **п'ятому розділі** «Імітаційне моделювання вибору екстреної стратегії розходження і обробка експериментальних матеріалів» розглянуто імітаційне моделювання вибору екстреної стратегії розходження і обробка експериментальних матеріалів.

Для імітаційного моделювання теоретичних результатів проведеного дисертаційного дослідження на базі отриманих аналітичних залежностей сформований алгоритм вибору маневру екстреного розходження в ситуації надмірного зближення.

Проведення коректного імітаційного моделювання потребує використання в імітаційній моделі реальних параметрів поворотності судна. Тому в реальних умовах експлуатації проводилися натурні спостереження повороту контейнеровозу «Oxford», які дозволили накопичити статистичні дані для визначення параметрів його поворотності з метою визначення динамічної моделі і обчислення чисельних значень її параметрів.

В умовах експлуатації отримані експериментальні дані повороту судна вправо і вліво при кутах кладки керма 15 градусів (відповідно перший і другий маневри). При цьому кожний з маневрів виконувався із швидкістю 24 вузли по чотири рази в максимально схожих умовах: при стані моря 2-4 бали, вітру 2-3 бали і за відсутності течії.

Для моделі обертального руху судна першого порядку єдиним невідомим параметром є значення сталої кутової швидкості повороту судна  $a_{\omega}$ , яке можна визначити, використовуючи декілька останніх інтервалів залежності  $\Delta K_i$  від  $t_i$ .

Для апроксимації початкового експериментального матеріалу динамічною моделлю третього порядку і обчислення відповідних значень параметрів  $T_1$  і  $T_2$  використовувався метод найменших квадратів в припущенні нормального закону розподілу похибок вимірювань.

Мірою розбіжності теоретичних і експериментальних даних в методі найменших квадратів є вираз:

$$\xi_i = \Delta K(t_i) - \Delta K_i =$$

$$a_{\omega} \{t_i - \{T_1^2 [1 - \exp(-t_i/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t_i/T_2)]\} / (T_1 - T_2)\} - \Delta K_i,$$

де  $\Delta K_i$  і  $t_i$  -  $i$ -е значення приріст курсу і відповідний йому момент часу.

Нормальні рівняння для обчислення коефіцієнтів  $T_1$  та  $T_2$  нелінійні і для їх розв'язання доцільно застосувати метод Ньютона. В результаті обробки експериментального матеріалу для першого маневру отримали  $T_1=9,62$ ,  $T_2=1,23$  і для другого маневру  $T_1=7,45$ ,  $T_2=0,80$ .

За допомогою отриманих параметрів були розраховані залежності  $\Delta K$  від часу  $t$  і отримані залежності порівнювалися з експериментальними даними, при цьому було отримане гарне сходження теоретичного і модельного результатів.

Для проведення імітаційного моделювання була розроблена комп'ютерна програма на мові високого рівня «Delphi», яка містить модуль вибору початкової ситуації надмірного зближення, модуль аналізу поточної ситуації і вибору безпечного маневру екстреного розходження.

Для написання комп'ютерної програми використані алгоритми, отримані в даному розділі. Програма контролює приналежність ситуації, що вводиться, до множини ситуацій надмірного зближення. Якщо для ситуації характерне надмірне зближення, то можливе введення такої ситуації. Інакше, якщо ситуацію ввести в програму, то програвання екстреного маневру не відбудеться.

Імітаційна програма аналізує ситуацію надмірного зближення з позицій цілі, визначає екстрену стратегію розходження і керує рухом цілі.

Користувач може керувати рухом судна, викликаючи перекладання керма судна протягом 20 с, починаючи з моменту початку маневру. Імітаційна програма аналізує маневр судна і в разі потреби корегує стратегію екстреного розходження. Після етапу виходу цілі на курс, рівний зворотному пеленгу на судно, визначаються параметри екстреної стратегії розходження і їх значення виводяться на інформаційній панелі.

Імітаційне моделювання полягало в наступному. Для 28 стандартних ситуацій і 22 сформованих імітувався процес розходження за допомогою екстреної стратегії, вибраної ціллю при різних типах поведінки судна.

Для кожної з 50 ситуацій розглядалося три варіанти поведінки судна: проходження з незмінними параметрами руху, судно ухиляється вправо і судно ухиляється вліво. Причому початок ухилення здійснювався у будь-який момент часу на інтервалі від 0 до 20 с. Після 20 с імітаційною програмою кермо судна автоматично приводилося в діаметральну площину і курс судна ставав незмінним. Цей момент часу сприймався ціллю, як кінець маневру судна і по параметрах ситуації у момент закінчення ухилення судна проводиться оцінка небезпеки зближення і у разі потреби розраховувалися нові параметри екстреної стратегії розходження, яка негайно реалізувалася ціллю.

Із 150 варіантів екстреної стратегії розходження, вибраних ціллю, всі виявилися коректними. Тут приведені результати імітаційного моделювання однієї із стандартних ситуацій (рис. 4).

На рис. 4 приведені траєкторія і послідовні положення судна і цілі протягом маневру у випадку, коли судно рухається з незмінними курсом і швидкістю.

З рисунку видно, що спочатку ціль лягає на циркуляцію від судна, проте після перетину його лінії курсу вона перекладає кермо на протилежний борт у бік програмного курсу. Якби ціль продовжувала виконувати циркуляцію, то могла б зіткнутися з судном, що наближається.

Таким чином, аналіз наведених результатів дозволяє стверджувати, що розроблений метод формування екстреної стратегії розходження в ситуаціях

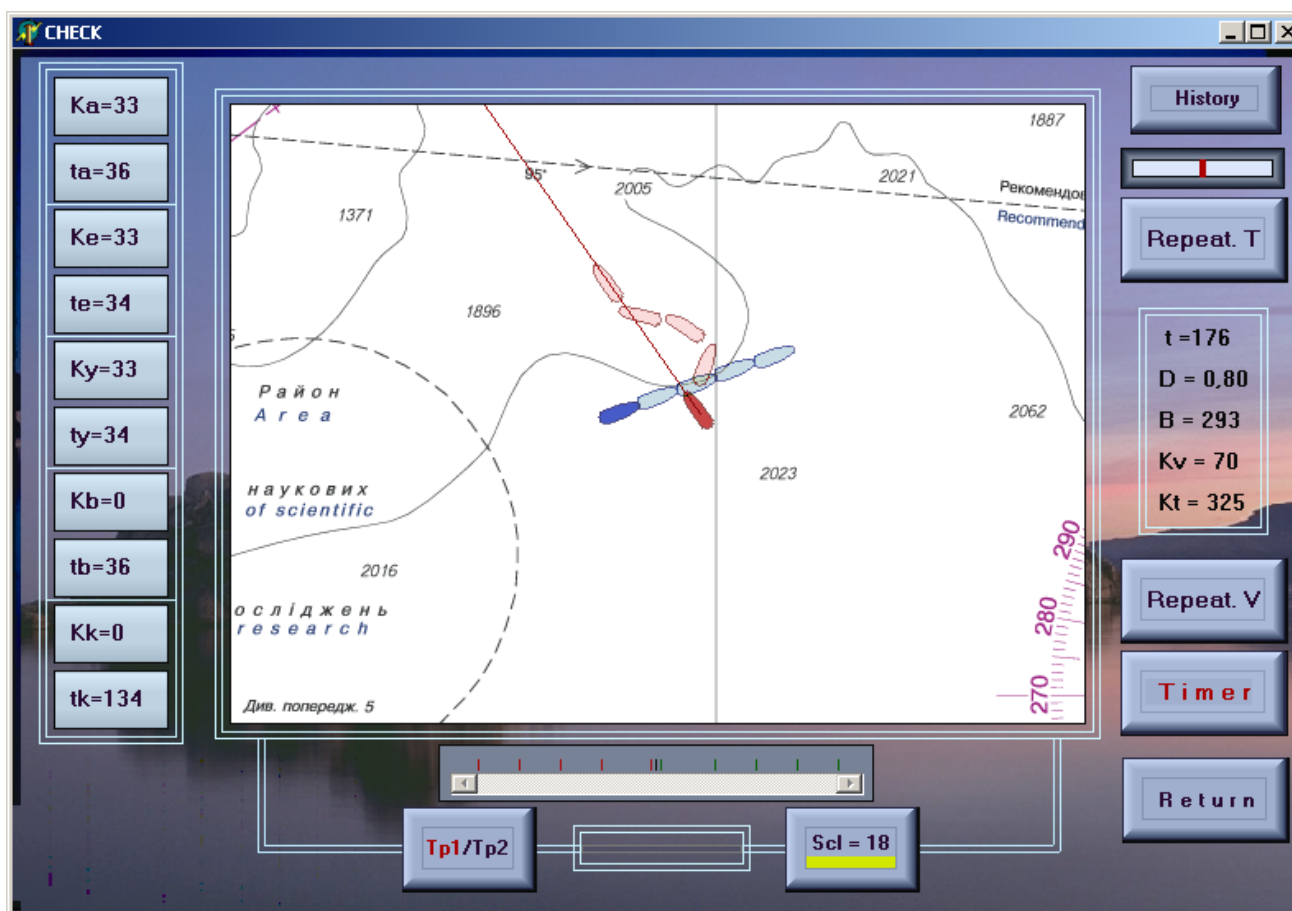


Рисунок 4 - Екстрена стратегія цілі за відсутності маневру судна

надмірного зближення забезпечує безаварійне розходження суден в стислих районах плавання.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [3, 4, 11, 12, 14].

## ВИСНОВКИ

В стислих водах виникають ситуації надмірного зближення суден, коли для запобігання зіткненню кожне з суден повинне згідно МППЗС-72 здійснити маневр розходження. Формалізація взаємодії суден при надмірному зближенні

ускладнена невизначеністю їх поведінки. Існуючі в даний час методи формування стратегій розходження суден не враховують ситуації надмірного зближення, що обумовлює актуальність і перспективність даного дисертаційного дослідження.

У дисертації отримано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки методу вибору стратегії екстреного розходження в ситуації надзвичайного зближення суден, який відрізняється урахуванням невизначеності в поведінці цілі, чинників, що заважають, і динаміки судна, чим забезпечується розрахунок параметрів безпечного маневру розходження.

Вперше отримані наступні наукові результати:

- спосіб ідентифікації ситуації надмірного зближення, яка вимагає застосування маневру екстреного розходження з урахуванням часового параметру і форми та розмірів зони безпеки;

- процедура визначення структури маневру екстреного розходження залежно від поточної відносної позиції, причому така структура в загальному вигляді містить етапи екстреного відхилення судна та виходу на його програмну траєкторію руху, або, залежно від початкової ситуації надмірного зближення, судно може запобігти зіткненню застосуванням циркуляції;

- процедура поодиначного та сумісного урахування наявності навігаційних перешкод і суден, що заважають, при розрахунку курсу відхилення екстреного розходження, на що впливають відносні позиції небезпечного судна та судна, що заважає, а також їх параметри руху.

Удосконалено спосіб розходження судна в ситуації, коли ціль має перевагу в швидкості в ситуації надмірного зближення на попутних курсах, а судно запобігає зіткненню, виконуючи циркуляцію від небезпечної цілі та пропускаючи її.

Отримав подальший розвиток метод розходження суден з урахуванням поворотності судна в ситуації небезпечного зближення.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в крюїнговій компанії «СМА ШПС Україна», в судноплавній компанії «Бурбон Офшор Україна», в приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр», в науково-дослідницькій діяльності, а також у навчальних програмах судноводіїв з дисципліни «Управління судном» НУ «ОМА», що підтверджується відповідними актами.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурмака, И.А. Расчёт параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям [Текст] / Бурмака И.А., **Бурмака А.И.** // Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 19. - Одесса: «ИздатИнформ», 2010. - С. 24-27.

2. Бурмака, А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации опасного сближения [Текст] / **Бурмака А.И.** // Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 20. - Одесса: «ИздатИнформ», 2011. - С. 32-35.

3. Бурмака, А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения [Текст] / **Бурмака А.И.** // Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 21. - Одесса: «Издат-Информ», 2012. - С. 38-41.

4. Бурмака, И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения [Текст] / Бурмака И.А., Сафин И.В., **Бурмака А.И.** // Проблемы техники: науково-виробничий журнал. ОНМУ, № 4. - Одеса: «Фірма «Інтерпрінт»», 2014. - С 108-118.

5. Бурмака, А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения [Текст] / **Бурмака А. И.** // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург. - 2014. - выпуск 1 (23). - С. 20-22.

6. Бурмака, А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения на попутных курсах [Текст] / **Бурмака А. И.** // Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск. - 2014. - выпуск 2 (7). - С. 14-17.

7. Бурмака, А.И. Идентификация ситуации чрезмерного сближения [Текст] / **Бурмака А.И.** // Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 23. - Одесса. - 2013. - С. 13-20.

8. Бурмака, А.И. Оптимальное уклонение при чрезмерном сближении [Текст] / **А.И. Бурмака** // Мат. VI Всеукраїнської науково-технічної конф. «Ефективна та безпечна експлуатація морських суден та споруд». - Севастополь. - 2013. - С. 130-132.

9. Бурмака, А.И. Определение ситуации чрезмерного сближения судов [Текст] / **А.И. Бурмака** // Мат. наук. - метод. конф. «Забезпечення безаварійного плавання суден». - Одеса, ОНМА, 2011. - С. 56-57.

10. Бурмака, А.И. Расчет параметров маневра расхождения в ситуации экстремального сближения с учетом угловой скорости судна [Текст] / **А.И. Бурмака** // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: матеріали наук.-техн. конф., - Одеса, ОНМА, 2012. - С. 102-103.

11. Бурмака, А.И. Стратегия экстренного расхождения при плавании судов на попутных курсах [Текст] / **А.И. Бурмака** // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: матеріали наук.-техн. конф., - Одеса, ОНМА, 2013. - С. 82-85.

12. Бурмака, И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов [Текст] / Бурмака И.А., **Бурмака А.И.**, Бужбецкий Р.Ю. - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), 2014. - 202 с.

13. Бурмака, А.И. Формализация ситуации чрезмерного сближения судов [Текст] / **А.И. Бурмака** // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Науковий журнал / ХДМА, № 1(6). - Херсон: Видавництво ХДМА, 2012. - С. 43-46.

14. Бурмака, А.И. Ситуационно-технические проблемы при выборе маневра расхождения в условиях чрезмерного сближения судов [Текст] / **А.И. Бурмака** // Проблемы техники: Науково-виробничий журнал / ОНМУ, № 1

- Одеса: «Фірма «Інтерпрінт»», 2013. - С. 124-128.

## АНОТАЦІЯ

**Бурмака О.І.** Розробка методу вибору стратегії розходження в ситуації надзвичайного зближення суден. - Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.22.13 - навігація і управління рухом. Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2016 р.

У роботі розглянута розробка методу формування екстреної стратегії розходження в ситуації надзвичайного зближення суден з урахуванням заважаючих чинників і динаміки судна.

Формалізовано опис ситуації надмірного зближення судна з ціллю і визначення максимальної дистанції найкоротшого зближення.

Встановлено, що ситуація надмірного зближення реалізується у разі, коли максимальна дистанція найкоротшого зближення не перевищує по величині мінімальну гранично-допустиму дистанцію зближення і отримано аналітичний вираз вказаної умови.

Отримані аналітичні вирази для мініимальної гранично-допустимої дистанції зближення трьох форм, що найчастіше зустрічаються: круга, еліпса і прямокутника.

Отримана процедура формування стратегії екстреного розходження і складу її структури, яка в загальному випадку може містити до п'яти етапів.

Розроблена процедура розрахунку параметрів першого етапу стратегії екстреного розходження, яка передбачає відворот судна з програмної траєкторії на курс екстреного ухилення і отримано спосіб розрахунку параметрів її подальших етапів. Запропоновано метод екстреного розходження судна з ціллю при надмірному зближенні на попутних курсах.

Розглянуто урахування інерційності судна при розрахунку параметрів маневру екстреного розходження.

Приведені результати імітаційного моделювання методу вибору екстреної стратегії розходження і отримані оцінки моделі поворотності з експериментальних спостережень повороту судна в реальних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, надзвичайне зближення, екстремальна стратегія розходження, імітаційна модель.

## АННОТАЦИЯ

**Бурмака А.И.** Разработка метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов. - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.22.13 - навигация и управление движением. Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, 2016 г.

В работе рассмотрена разработка метода формирования экстренной стратегии расхождения в ситуации чрезмерного сближения судов с учетом мешающих факторов и динамики судна.

Формализовано описание ситуации чрезмерного сближения судна с целью и определение максимальной дистанции кратчайшего сближения.

Показано, что максимальная дистанция кратчайшего сближения определяется начальной относительной позицией, параметрами движения судна и цели, а также зависит от соотношения скоростей судна и цели.

Установлено, что ситуация чрезмерного сближения реализуется в случае, когда максимальная дистанция кратчайшего сближения не превосходит по величине минимальную предельно-допустимую дистанцию сближения и получено аналитическое выражение указанного условия.

Произведена формализация минимальной предельно-допустимой дистанции сближения и получены аналитические выражения для минимальной предельно-допустимой дистанции сближения трех наиболее часто встречающихся форм: круга, эллипса и прямоугольника.

Получена процедура формирования стратегии экстренного расхождения и состава ее структуры, которая в общем случае может содержать до пяти этапов. Разработана процедура учета навигационных опасностей и мешающих судов при расчете маневра экстренного расхождения.

Получен метод расчета параметров стратегии экстренного расхождения судна с целью.

Разработана процедура расчета параметров первого этапа стратегии экстренного расхождения, предусматривающая отворот судна с программной траектории на курс экстренного уклонения и получен способ расчета параметров ее последующих этапов. Предложен метод экстренного расхождения судна с целью при чрезмерном сближении на попутных курсах.

Рассмотрен учет инерционности судна при расчете параметров маневра экстренного расхождения.

Приведены результаты имитационного моделирования метода выбора экстренной стратегии расхождения и получены оценки модели поворотливости из экспериментальных наблюдений поворота судна в реальных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, предупреждение столкновений судов, чрезмерное сближение, экстремальная стратегия расхождения, имитационная модель.

## ANNOTATION

Burmaka A. Development of method of choice of strategy of divergence in the situation of extraordinary rapprochement of vessels. - The dissertation is the manuscript. The dissertation is on competition of scientific degree of candidate of engineering sciences. Speciality 05.22.13 - navigation and movement management. National University "Odessa maritime academy", Odessa, 2016.



Development of method of forming of urgent strategy of divergence in the situation of excessive rapprochement of vessels taking into account preventing factors and dynamics of ship is considered in work.

Formalization of description of situation of excessive rapprochement of ship with a purpose and determination of maximal distance of the shortest rapprochement.

It is set that the situation of excessive rapprochement will be realized in the case when maximal distance of the shortest rapprochement does not excel on a size minimum maximum-possible distance of rapprochement and analytical expression of the indicated condition is got.

Analytical expressions for minimum maximum-possible distance of rapprochement of three most often meeting forms are got: circle, ellipse and rectangle.

Procedure of forming of strategy of urgent divergence and composition of its structure which in general case can contain to five stages is got.

Procedure of calculation of parameters of the first stage of strategy of urgent divergence is developed, foreseeing change of course of ship from a programmatic trajectory to the course of urgent deviation and the method of calculation of parameters of her is got subsequent stages. The method of urgent divergence of ship with a purpose at excessive rapprochement on passing courses is offered.

The account of inertia of ship at the calculation of parameters of maneuver of urgent divergence is considered.

The results of imitation design of method of choice of urgent strategy of divergence are resulted and estimations of model of agility from the experimental supervisions of turn of ship in the real external environments are got.

**Keywords:** safety of navigator, warning of collisions of vessels, excessive rapprochement, extreme strategy of divergence, simulation model.

Підп. до друку 11.05.2016 р. Формат 60x84/16. Папір офсет.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.  
Тираж 100 пр. Зам. № И16-05-04

Національний університет «Одеська морська академія»  
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.  
Тел./факс (0482) 34-14-12  
publish-r@onma.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1292 від 20.03.2003